

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 28/04/2025.



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**PALEONTOLOGIA DA PASSAGEM EDIACARANO-
CAMBRIANO NA FORMAÇÃO TAGATIYA GUAZÚ, GRUPO
ITAPUCUMI (GONDWANA OCIDENTAL), NE DO PARAGUAI**

Lucas Inglez

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

LUCAS INGLEZ

**PALEONTOLOGIA DA PASSAGEM EDIACARANO-
CAMBRIANO NA FORMAÇÃO TAGATIYA GUAZÚ,
GRUPO ITAPUCUMI (GONDWANA OCIDENTAL), NE
DO PARAGUAI**

Tese de doutorado apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Lucas
Verissimo Warren

Rio Claro – SP
2023

I51p

Inglez, Lucas

Paleontologia da passagem Ediacarano-Cambriano na Formação
Tagatiya Guazú, Grupo Itapucumi (Gondwana Ocidental), NE do
Paraguai / Lucas Inglez. -- Rio Claro, 2023

278 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Veríssimo Warren

1. Paleontologia. 2. Bioestratigrafia. 3. Tafonomia. 4. Icnologia. 5.
Ediacarano. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTOS DA TESE

Esta tese discute temas relacionados às origens e padrões de diversificação inicial do Reino Animal, os quais ocorreram durante a passagem dos éons Proterozoico e Fanerozoico. Tal discussão é feita com base na avaliação da diversidade e distribuição paleoambiental de organismos fósseis e seus vestígios em um sítio paleontológico específico.

Esta pesquisa paleontológica faz uso de ferramentas fornecidas pelos campos da geologia, sedimentologia, estratigrafia, biologia sistemática, zoologia e paleoecologia, podendo ser incluída no campo das ciências básicas com uma abordagem histórica. Assim sendo, seus principais impactos são mais facilmente medidos em termos de suas implicações teórico-científicas, apenas tangenciando potenciais impactos sociais e não apresentando qualquer impacto econômico.

Dentre os impactos científicos pode-se incluir a caracterização dos padrões de distribuição estratigráfica (temporal) e faciológica (paleoambiental) dos organismos fósseis do sítio estudado. A primeira demonstrando o sugestivo caráter transicional (não abrupto) do processo de desenvolvimento dos primeiros ecossistemas marinhos dominados por animais. O segundo contribuindo com ideias relativas ao ambiente e modo de vida destes organismos. Assim sendo, esta tese deve ser de potencial relevância para pesquisadores interessados neste contexto paleobiológico.

Entre os potenciais impactos de cunho social, lista-se aqueles associados a produção de novos conhecimentos sobre a história da vida na Terra, os quais permitem que nos debrucemos sobre questões existenciais relacionadas às origens das formas de vida complexas (que incluem humanos). Além disso, ao fornecer vislumbres da diversidade da vida no passado geológico da Terra, e das trajetórias evolutivas trilhadas por distintas linhagens, estudos paleontológicos em geral, têm o potencial de fomentar na sociedade a percepção da importância de se preservar e recuperar a diversidade biológica do presente.

IMPACTS OF THE THESIS

This thesis discusses themes related to the origin and early diversification patterns of the Animal Kingdom, which took place during the period spanning the latest Proterozoic and earliest Phanerozoic eons. It approaches the issue by evaluating the diversity, and paleoenvironmental distribution of fossil organisms and their traces in one specific geological site.

This paleontological research utilizes tools provided by geology, sedimentology, stratigraphy, systematic biology, zoology, and paleoecology. It is included within a field of basic sciences with a historical approach. Thus, its main impacts can more easily be addressed in terms of their scientific effects, only indirectly touching potential social impacts, and not having any potential economic impact.

In terms of its scientific impacts, one may include the characterization of the stratigraphical (temporal) and faciological (paleoenvironmental) distribution of fossils in the study site. The first demonstrates a suggestive transitional (non-abrupt) signal regarding the process of development of modern-style, animal-dominated marine ecosystems. The latter contributes to insights into where (paleoenvironment) and how (paleoecology) these ancient animals lived. As such, this thesis may be of potential relevance to researchers interested in this particular paleobiological context.

Potential social impacts can be listed among those associated with the production of knowledge concerning the history of life on the planet we inhabit. This allows the assessment of existential questions on the topic of the deep-time origins of complex life (that includes humans). In addition, by providing a picture of past biological diversity and the paths different lineages trailed throughout their history, paleontological studies, in general, have the potential to further the appreciation of society for the preservation and recovery of present-day biodiversity.

LUCAS INGLEZ

**PALEONTOLOGIA DA PASSAGEM EDIACARANO-CAMBRIANO NA
FORMAÇÃO TAGATIYA GUAZU, GRUPO ITAPUCUMI (GONDWANA
OCIDENTAL), NE DO PARAGUAI**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Geociências

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren (presidente)

Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild

Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões

Prof^a Dr^a Renata Guimarães Netto

Prof^a Dr^a Mírian Liza Alves Forancelli Pacheco

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 28 de abril de 2023

*A minha mãe, que tanto me incentivou, a
minha irmã, quem admiro tanto, a minha
tia-avó que tinha tantas enciclopédias, e a
todas as professoras e professores, que me
ajudaram a ver a beleza do mundo natural.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador o Prof. Dr. Lucas V. Warren, por todo apoio e parceria oferecida ao longo de todos os anos entre meu mestrado e doutorado. Em especial, agradeço a ele pelo treinamento técnico fornecido em termos do “*modus operandi*”, inerente ao fazer científico, da forma como ele está estruturado.

Em segundo lugar, agradeço imensamente a todo suporte, amizade, parceria, apoio e incentivo da Dra. Juliana Okubo. Sem sua amizade e companheirismo, o processo de doutoramento teria sido ostensivamente mais árduo.

Agradeço também ao auxílio, avaliação crítica e orientação prestados pela Profa. Dra. Renata Netto, essenciais para a caracterização icnotaxonômica do material de estudo, e escrita do artigo em anexo nesta tese.

Pela ajuda com a coleta de dados de campo, agradeço ao Prof. Dr. Luciano Alessandretti, à Dra. Luana de Moraes, ao Prof. Dr. Bernardo de Freitas e ao Me. Gabriel Antunes. Mais importante, à *Indústria Nacional del Cemento* (INC) do Paraguai e em especial ao Engenheiro Alberto Arias, pelo acesso a área de estudo e todo suporte logístico e receptividade durante as atividades de campo.

Em termos técnicos, agradeço ainda ao Dr. Mitsuru Arai e ao Prof. Dr. Dimas Dias-Brito, pelo auxílio relativo ao uso dos microscópios petrográficos da UnesPetro. Ao técnico Nelson (Júnior), pela ajuda e paciência no processo de preparo de amostras para petrografia. Ao Prof. Dr. Marcello Simões e Me. Mariza Rodrigues, pelo auxílio com o registro fotográfico de parte dos icnofósseis. Ao Prof. Dr. Mário Assine pela permissão de uso de equipamentos do Laboratório de Estudos Estratigráficos (LESTE-DG, Unesp). E ainda, ao Dr. Bruno Becker-Kerber, pela ajuda com as análises de Espectroscopia Raman. Também agradeço à Rosângela (da secretaria da pós-graduação) e à Márcia (do setor de limpeza), por garantirem o funcionamento do prédio da pós-graduação (até o início de 2023), e por todo auxílio técnico e burocrático relativos ao uso do mesmo.

À Profa. Dra. Rosemarie Rohn, agradeço por nossas conversas, seus conselhos e agradáveis atividades de campo. O compartilhamento de sua experiência contribuiu não apenas com minha formação como paleontólogo, como também com minha experiência docente, a qual considero parte fundamental de minha formação como doutor.

Aos meus amigos e colegas, Marcela Aragão, Antônio Lima, Bernardo Peixoto, Silvia Real, Bruna Santos, Jeferson das Virgens e José Augusto, agradeço pelas conversas, apoio emocional e parceria durante diferentes etapas da minha pós-graduação. Neste sentido, e com especial destaque, agradeço a Marly Silva, companheira de luta e companhia inestimável em momentos de grande isolamento. Igualmente em lugar de evidência, agradeço a Natasha Marteleto, minha amizade mais antiga e que, mesmo do outro lado do mar, esteve presente em tantos momentos, com risadas, conversas e trocas científicas. Também agradeço às tantas conversas, elucubrações, discussões filosóficas, e vivências, possíveis graças à amizade de Nat. Ainda no início de meu doutorado, nossa parceria ressignificou muitas das minhas aspirações como pessoa e cientista.

Aos meus companheiros da República Noea, Moisés, Tainan, Victor Hugo, Marcos, Bruno, Vinícius Destefani, Vinícius Toledo e Murilo Pasking agradeço pelo acolhimento em uma das fases mais difíceis dos anos de 2020-2023.

Também, sem dúvidas à Alexandra Elbakyan, pelo auxílio com o acesso a diversas fontes bibliográficas.

Ainda, agradeço imensamente à minha mãe, Claudia Inglez e irmã, Mariana Inglez pelo apoio emocional e compreensão por todos os sacrifícios que tive de fazer para completar esta fase de minha formação acadêmica.

Por fim, segue abaixo meus agradecimentos às agências de fomento, as quais forneceram bolsas de doutorado (Capes e CNPq) e financiaram a coleta de dados em campo e análises laboratoriais (FAPESP e CNPq), expressos de acordo com o modelo exigido:

- Processo nº 2018/26230-6, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)
- Processo nº 153743/2019-0, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

Os estágios terminais do Período Ediacarano (565-538 Ma) foram palco de profunda reestruturação ecossistêmica, associada a irradiação de organismos multicelulares e o aparecimento de animais bilatérios no registro fóssil. Dentre as importantes novidades evolutivas ocorridas durante a transição Ediacarano-Cambriano, tem-se o aparecimento de táxons bentônicos esqueletizados e o aumento na abundância e disparidade morfológica (denotando maior complexidade ecológica e comportamental) das estruturas de bioturbação. Neste contexto, e com idade mínima de 536 Ma, a Formação Tagatiya Guazú (FTG) (Grupo Itapucumi) no nordeste do Paraguai, contém abundante conteúdo fóssil esquelético, bem como inédita assembleia de icnofósseis. Deste modo, esta tese tem por objetivos principais: 1) caracterizar a diversidade taxonômica da assembleia fóssil; 2) posicionar estratigraficamente as associações fossilíferas, caracterizando sua distribuição em distintas fácies e estilos preservacionais; 3) caracterizar as estruturas de bioturbação em termos de sua icnodiversidade e 4) discutir as implicações paleoecológicas e bioestratigráficas da assembleia. O detalhamento taxonômico permitiu o reconhecimento de *C. hartmannae*, *C. cf. carinata*, *Cloudina* sp., cf. *Zuunia chimdtsereni*, *Sinotubulites* sp., *Corumbella weneri*, cf. *Namacalathus hermanastes*, além de thalli de vendotaeniáceas e outros restos de macroalgas de afinidade incerta. Os fósseis ocorrem preferencialmente em fácies lagunares microbialíticas (depositadas em ambientes de inframaré rasa a inter- e supramaré) e, sua caracterização tafonômica qualitativa sugere preservação controlada por eventos de rápido soterramento, e precoce cimentação carbonática. Ambos os processos são indicados como essenciais para a alta qualidade de preservação de carapaças predominantemente orgânicas e delicadas, e de organismos de corpo mole como compressões carbonificadas. Em sentido ao topo do intervalo analisado foi notada expressiva diminuição na abundância e diversidade de táxons esqueléticos, associada a mudança abrupta nos padrões de bioturbação. Enquanto na base, apenas estruturas suspeitas, irregulares e morfológicamente simples foram observadas, no topo são registrados níveis com abundantes icnofósseis (1-9% de índices de bioturbação nos planos de acamamento), com considerável icnodisparidade. Estes incluem icnotáxons atribuíveis a *Bergaueria hemisphaerica*., *Skolithos* isp., *Planolites* isp., cf. *Torrowangea* isp., *Treptichnus* isp., *Phycodes palmatus*, abundantes treptinídeos e estruturas helicoidais (tipo-*Streptichnus*) além de raras pistas bilobadas rusophyciformes. Esta diversidade de planos arquiteturais sugere padrões de bioturbação mais típicos de ecossistemas terranovianos, do que aqueles reportados para o Ediacarano terminal. Assim, considerando 1) a ausência de hiatos estratigráficos expressivos na sucessão avaliada, 2) sua idade mínima de ~536 Ma, 3) a proximidade vertical de intervalos bioturbados e com abundantes fósseis tipicamente Ediacaranos, é reforçado o caráter proeminentemente gradacional das transformações faunísticas que marcaram a transição Ediacarano-Cambriano.

Palavras-chave: Limite Ediacarano-Cambriano, bioestratigrafia, tafonomia, icnologia, treptichnídeos, cloudinídeos

ABSTRACT

The terminal Ediacaran Period, spanning from 565-538 million years ago, was a time of significant ecological restructuring, linked to the emergence of diverse multicellular marine organisms, and the first appearance of bilaterian animals in the fossil record. Among important evolutionary novelties the Ediacaran-Cambrian Transition was marked by the appearance of skeletonized benthic taxa and the increase in abundance and disparity (denoting further ecological and behavioural complexity) of bioturbation structures. Within this context, the Tagatiya Guazú Formation (TGF) (Itapucumi Group) in northeastern Paraguay contains abundant fossil skeletal remains and an undescribed ichnofossil assemblage that date back to ~536 Ma ago. Thus, the main objectives of this thesis are to 1) characterize the taxonomic diversity of the fossil assemblage, 2) stratigraphically position the fossil associations, 3) describe the bioturbation structures, and 4) discuss their paleoecological and biostratigraphic implications. The taxonomic assessment of body fossils indicates the presence of *C. hartmannae*, *C. cf. carinata*, *Cloudina* sp., cf. *Zuunia chimdtsereni*, *Sinotubulites* sp., *Corumbella weneri*, cf. *Namacalathus hermanastes*, abundant thalli of vendotaeniaceans, as well as macroalgal remains of uncertain affinity. The fossils are predominantly distributed within microbialitic lagoonal facies (from shallow sub- to inter- and supratidal settings) and were preserved through events of rapid sedimentation and early carbonate cementation. Both processes are indicated as key for the high-quality preservation of both delicate, and predominantly organic carapaces, as well as for the soft tissues of macroalgae as carbonaceous compressions. Towards the top of the stratigraphic interval a decrease in the abundance and diversity of body fossils is observed, along with an abrupt shift in the patterns of bioturbation. While the lower and middle parts of the succession display only morphologically simple and inconsistent structures, the uppermost interval contains abundant ichnofossils (Bedding Plane Bioturbation Indexes of ~1-9%), with considerable ichnodisparity. These include ichnotaxa such as *Bergaueria hemisphaerica*, *Skolithos* isp., *Planolites* isp., cf. *Torrowangea* isp., *Treptichnus pedum*, *Phycodes palmatus*, abundant treptichniids, potential helicoidal structures (*Streptichnus*-like), besides rare hypichnial bilobed rusophyciform burrows. The diversity of architectural designs suggests a bioturbation pattern more typical of Terraneuvian ecosystems than those reported for the terminal Ediacaran. Thus, given the 1) absence of stratigraphical hiatuses and sharp faciological shifts along the succession, 2) the recent geochronological data providing minimum age of ~536 Ma for the unit, and 3) the vertical association between trace fossil-bearing intervals and abundant typically Ediacaran skeletal metazoans, results reinforce the prominent gradational character of the major faunal turnovers that marked the Ediacaran-Cambrian Transition.

Keywords: Ediacaran-Cambrian transition, biostratigraphy, taphonomy, ichnology, treptichniids, cloudiniids

ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente documento apresenta os resultados obtidos e discussões derivadas de pesquisas científicas iniciadas em 2018 pelo proponente desta tese. Esta é definida como preriquisito para obtenção do título de doutor, sendo organizada da seguinte forma:

O Capítulo 1 introduz brevemente o leitor ao tema de pesquisa, apresentando como a área de estudo se insere nas problemáticas da investigação.

O Capítulo 2 posiciona geograficamente a região de estudo, apresenta os objetivos da pesquisa e aborda em detalhe os métodos empregados para a obtenção e discussão dos resultados.

O Capítulo 3 resume o arcabouço teórico que contextualiza os objetos de estudo no quadro paleobiológico e evolutivo do intervalo de tempo estudado.

O Capítulo 4 apresenta o contexto geológico regional e local da área de estudo.

Os capítulos de 5 a 7 referem-se aos resultados da pesquisa, apresentando respectivamente os dados de paleontologia sistemática, estratigrafia, sedimentologia e tafonomia obtidos. A ordem dos capítulos foi estabelecida considerando a lógica de apresentação dos táxons fósseis (principal objeto de estudo), sua distribuição estratigráfica e faciológica, e aspectos específicos de sua preservação. Resultados referentes a icnologia são apresentados na forma de dois manuscritos escritos em língua inglesa, presentes nos anexos 1 e 2 deste volume.

O Capítulo 8 traz uma discussão integrada dos aspectos sedimentológicos, tafonômicos, paleoecológicos e bioestratigráficos. Estes permitiram a reconstituição paleoambiental do intervalo estratigráfico analisado e também suas implicações em termos bioestratigráficos.

Por fim, como Anexo 3, segue resumo expandido, publicado como “*short article*” na revista *Estudios Geologicos*, em 2019.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização e acesso à área de estudo.	14
Figura 2- Relação entre os registros fóssil e do relógio molecular dos principais grupos de Metazoa.....	26
Figura 3 – Representantes de corpo mole de assembleias fósseis ediacaranas	28
Figura 4 –Principais planos corporais e distribuições cronoestratigráficas simplificadas de organismos fósseis com esqueletos tubulares no intervalo de transição Ediacarano-Cambriano	33
Figura 5 – Alguns táxons consituientes da fauna esquelética tubular do Ediacarano terminal.	39
Figura 6 – Mudanças evolutivas e padrões de bioturbação através da transição Ediacarano-Cambriano..	41
Figura 7 – Icnofósseis e estruturas suspeitas do Ediacarano terminal.....	43
Figura 8 – Resumo das mudanças nos padrões de bioturbação ao longo da transição Ediacarano-Cambriano.	47
Figura 9– Contexto geológico da Faixa Paraguai.....	50
Figura 10 – Contexto geológico local e estratigrafia do Grupo Itapucumi.	55
Figura 11– Modelo deposicional proposto para o Grupo Itapucumi.....	59
Figura 12 – Diversidade morfológica de <i>Cloudina hartmannae</i>	63
Figura 13 – <i>Cloudina hartmannae</i> com alto grau de sobreposição dos colarinhos.....	64
Figura 14 – <i>Cloudina</i> cf. <i>hartmannae</i> com proeminentes cristas longitudinais e deformação plástica.	66
Figura 15 <i>Cloudina</i> sp. com alta sinuosidade e possíveis ramificações.....	71
Figura 16 – Possíveis espécimes de <i>Zuunia chimidtsereni</i>	73
Figura 17 – Espécimes de cf. <i>Sinotubulites</i> sp..	77
Figura 18 – Corte transversal de <i>Sinotubulites</i> cf. <i>baimatuoensis</i>	78
Figura 19 – Espécime inteiro de <i>Corumbella werneri</i> preservado achatado.....	81
Figura 20 – <i>Corumbella</i> cf. <i>werneri</i> com distintos estilos preservacioais..	83
Figura 21 – Possíveis variantes preservacionais de <i>Corumbella werneri</i>	85
Figura 22 – Espécimes com parede com estruturação tripartite em seção delgada (cf. <i>Corumbella werneri</i>)..	86
Figura 23 – Espécimes de cf. <i>Namacalathus hermanastes</i>	89
Figura 24 – Possível fragmento de <i>Namacalathus hermanastes</i>	92
Figura 25 – Metáfitas com morfologia em fita e possivelmente tubiformes.....	95
Figura 26 - Metáfitas com morfologia em fita com evidência de ramificação.	96
Figura 27 – Morfotipos não identificados ou de identificação duvidosa..	100
Figura 28 - Distribuição das localidades estudadas sobre mapa geológico e modelo digital de terreno (MDT).....	103
Figura 29 – Depósitos de perimaré do intervalo basal a intermediário da Fm. Tagatiya Guazu.....	109
Figura 30 – Seção colunar SA (Localidade L1).	110
Figura 31 – Estruturas potencialmente evaporíticas e de exposição subaérea.	112
Figura 32 – Afloramentos da porção intermediária da Formação Tagatiya Guazú.....	114
Figura 33 – Depósitos de sub- a intermaré do intervalo intermediário a superior da unidade..	117
Figura 34 - Seção colunar SB (Localidade L3).	118

Figura 35 – Níveis altamente bioturbados do topo da seção SB	119
Figura 36 – Assembleia de icnofósseis do topo do intervalo analisado..	121
Figura 37 – Fácies de inter- a supramaré expostos na Localidade L4.....	123
Figura 38 - Fácies de sub- a supramaré expostos na Localidade L5.	125
Figura 39 – Depósitos de inter a supramaré expostos na localidade L2.....	126
Figura 40 – Tafofácies T1 e T2.	133
Figura 41 - Tafofácies T3..	135
Figura 42 – Elementos autigênicos e de origem orgânica presentes na tafofácies T3.	137
Figura 43 - Análises de espectroscopia Raman em espécimes da T3.	138
Figura 44 – Tafofácies T5.	141
Figura 45 – Análises de espectroscopia Raman e MEV em macroalgas.....	143
Figura 46 – <i>Cloudina hartmannae</i> em pavimentos associados a Tafofácies T6.....	145
Figura 47 – Detalhamento petrográfico da tafofácies T6..	147
Figura 48 - Tafofácies T7..	149
Figura 49 - Detalhamento petrográfico da tafofácies T7. A e B.	151
Figura 50 - Análises de espectroscopia Raman em espécimes da T7.	152
Figura 51 - Tafofácies T8.1..	154
Figura 52 – Abundantes espécimes de <i>Corumbella</i> no topo de camada de Ml.....	155
Figura 53 – Fósseis e microfósseis da tafofácies T8.1.	157
Figura 54 – Tafofácies T8.2.	158
Figura 55 – Proposta de correlação lateral entre as seções colunares analisadas.....	163
Figura 56 – Modelo do sistema deposicionais com foco nos ambientes de sedimentação representados pela associação de fácies da Formação Tagatiya Guazú.	166
Figura 57 - Modelo taofaciológico e distribuição dos distintos depósitos fossilíferos ao longo das zonas de sub- a supramaré.....	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação e localização de afloramentos estudados neste trabalho.....	15
Tabela 2 – Características morfológicas e composicionais dos principais táxons tubulares do Ediacarano terminal e início do Fortuniano.....	35
Tabela 3 - Icnoguildas e icnotáxons representativos de estratos ediacaranos.	46
Tabela 4 Tabela de fácies da associação de perimará da Formação Tagatiya Guazú. .	104
Tabela 5 – Tabela de tafofácies simplificada	130

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 2: PERGUNTAS CIENTÍFICAS, MATERIAIS E MEIOS PARA RESPONDÊ-LAS.....	13
2.1. Localização e acesso a área de estudo	13
2.2. Objetivos da tese e perguntas científicas	15
2.3. Perguntas a serem respondidas	16
2.4. Material e métodos de trabalho	16
2.3.1. Trabalho de campo e análise de fácies	17
2.3.2. Paleontologia sistemática e caracterização taxonômica, morfológica e composicional de elementos fósseis esqueléticos e orgânicos	18
2.3.3. Análises tafonômicas.....	20
2.3.4. Análises icnológicas	22
CAPÍTULO 3: PALEOBIOLOGIA DA PASSAGEM EDIACARANO-CAMBRIANO	24
3.1 A origem e diversificação de Metazoa e as raízes Ediacaranas da ‘Explosão Cambriana’	24
3.2. O Ediacarano terminal e a transição para ecossistemas dominados por eumetazoários	31
3.2.1. A ascensão das Faunas esqueléticas Tubícolas	31
3.2.2. Diversificação das interações animal-substrato.....	40
CAPÍTULO 4: CONTEXTO GEOLÓGICO E ARCABOUÇO BIOESTRATIGRÁFICO	48
4.1. Faixas móveis e coberturas cratônicas neoproterozoicas da porção SW de Gondwana	48
4.1.1. Faixa Paraguai Sul e evolução sedimentar do Grupo Corumbá	51
4.1.2. Faixa Vallemi e evolução sedimentar do Grupo Itapucumi	53
CAPÍTULO 5: IDENTIFICAÇÃO E DIVERSIDADE MORFOLÓGICA DO CONTEÚDO FÓSSIL ESQUELETAL E DE CORPO MOLE.....	60
5.1. Cloudinídeos.....	60
5.2. <i>Sinotubulites</i>	74
5.3. <i>Corumbella</i>	78
5.4. <i>Namacalathus</i>	87
5.5. Metáfitas	93
5.6. Outros.....	98
CAPÍTULO 6: ANÁLISE DE FÁCIES E ESTRATIGRAFIA	101
6.1. Arcabouço estrutural e geológico básico da área de afloramento	101
6.2. Sucessão vertical e associação de fácies da Formação Tagatiya Guazú	104
6.2.1. Seções da porção basal e intermediária do intervalo analisado.....	107
6.2.3. Seções da porção intermediária e de topo do intervalo analisado	115

CAPÍTULO 7: CARACTERIZAÇÃO TAFONÔMICA	128
7.1. Depósitos de <i>grainstone</i> e <i>grainstone</i> oolítico a pisolítico.....	132
7.2. Depósitos de <i>mudstone</i> (M) e <i>mudstone</i> (Mi) impuro	134
7.3. Depósitos microbiais	143
7.3.1. Trombólitos	143
7.3.2. Lama peloidal, rica em fragmentos de esteira	148
7.3.3. Microbialitos estratiformes.....	152
CAPÍTULO 8: PALEOAMBIENTE, PALEOECOLOGIA E BIOESTRATIGRAFIA DA BIOTA TAGATIYA GUAZÚ	159
8.1. Interpretações paleoambientais e paleoecológicas	159
8.1.1. Definição do sistema deposicional, dos ciclos estratigráficos e correlação lateral dos perfis analisados	159
8.1.2. Controles sedimentológicos e diagenéticos para a preservação dos fósseis corpóreos	166
8.1.3. Inferências paleoecológicas	177
8.2. Implicações paleobiogeográficas e bioestratigráficas da assembleia fóssil	181
CAPÍTULO 10: CONSIDERAÇÕES FINAIS	184
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186
ANEXOS	207
Anexo 1: Artigo publicado	208
Anexo 2: Artigo em preparação.....	224
Anexo 3: Artigo publicado	275

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Sucessões sedimentares do final do Neoproterozoico terminal e início do Paleozoico (630-~520 Ma) contêm o registro de profundas transformações paleoambientais e bióticas jamais ocorridas no planeta (Xiao & Kauman, 2006; Mángano & Buatois 2016; 2020; Darroch et al. 2021). Entre elas, destacam-se processos geotectônicos, como a fragmentação do supercontinente Rodinia (Hoffman 1991, Li et al. 2008), paleoclimáticos, associados a eventos de glaciação global (Embleton & Williams 1986, Hoffman & Schrag 2002) e paleobiológicos, relacionados à origem e diversificação de organismos metazoários (Knoll & Carroll 1999, McCall, 2006, Xiao & Laflamme 2008). No contexto dessas transformações, o Período Ediacarano (635-541 Ma, Knoll et al. 2006) destaca-se pelo aparecimento no registro fóssil das mais antigas assembleias de megafósseis atribuídos a organismos multicelulares. Essas incluem em sua maior parte organismos bentônicos de corpo mole das assembleias Avalon (575-560 Ma), White Sea (560-550 Ma) e Nama (549-538 Ma), com possíveis representantes de ramos basais de Eumetazoa (p. ex. *Rangea* e *Charnia*.) e possíveis membros basais de Bilateria (p. ex. *Kimberella*, *Spriggina*, *Yilingia*) (Waggoner 2003, Narbonne 2005, Bottjer & Clapham 2006, Hoyal-Cuthill & Han 2018, Chen et al. 2019; Dunn et al. 2019;). Com idades mais próximas à passagem para o Período Cambriano, a denominada Assembleia Nama é caracterizada pelo registro dos primeiros exemplos de formas com exoesqueletos fracamente biomineralizados, tais como os cloudinídeos (ou “cloudinomorfos” *sensu* Selly et al. 2019) e outros táxons de tubulares de afinidade incerta (p. ex. *Sinutubulites* sp. *Shaanxilithes* sp., *Corumbella* sp.), além de organismos com carapaças de morfologia complexa e ainda pouco compreendidas do ponto de vista composicional e estrutural como *Namacalathus* sp. e *Namapoikia* sp. (Wood et al. 2014, Zhuravlev et al. 2015; Shore et al. 2021).

A complexificação das relações ecológicas (Wood 2011), associada à diversificação de metazoários na passagem Ediacarano-Cambriano teve profundos impactos ambientais no contexto paleobiológico do Proterozoico, predominantemente dominado por comunidades microbiais. Entre os principais impactos incluem-se: 1) o aparecimento de metazoários pastadores que passaram a consumir esteiras microbiais, possivelmente contribuindo para o declínio dessas comunidades (Fedonkin & Waggoner 1997, Bottjer et al. 2000; Seilacher 1999, Buatois & Mángano 2011); 2) a diversificação de estratégias de exploração e ocupação de distintos ecoespaços, expressos em diferentes

profundidades da coluna d'água e do substrato (*tiering*) Clapham & Narbonne 2002, Wood 2011), e 3) a origem e diversificação de estruturas biomineralizadas (esqueletogênese) (Warren et al. 2012, 2013). Esse último aspecto evolutivo tem como consequência a introdução de uma nova classe de grãos sedimentares autigênicos (bioclastos), inovação que alterou de maneira significativa a dinâmica de sistemas deposicionais marinhos costeiros, especialmente em termos da evolução e arquitetura de plataformas carbonáticas (Pratt, 1982, Warren et al. 2013).

Nesse contexto, o Grupo Itapucumi, localizado no nordeste do Paraguai, representa uma extensa plataforma mista siliciclástica-carbonática depositada diretamente sobre o embasamento Paleoproterozoico do Cráton do Rio Apa (Warren 2011, Warren et al. 2019). Esta unidade caracteriza-se por uma estreita faixa de dobramentos e uma ampla área de cobertura cratônica (Warren 2011, Warren et al. 2019), constituindo uma sucessão de aproximadamente 400 m de espessura. Sua porção inferior é constituída por arenitos imaturos da Formação Vallemí, separados no topo por uma superfície erosiva com os depósitos de *grainstone* oolítico dolomitizados da Formação Camba Jhobo, estes lateralmente equivalentes a sucessão de cerca de 50m de calcários indeformados da Formação Tagatiya Guazú (Warren et al. 2019). A Formação Tagatiya Guazú é notavelmente detentora de assembleia fóssil típica do Período Ediacarano terminal (Assembleia *Nama*, Bottjer & Clapham 2006, McCall 2006), destacando-se pela presença de abundantes espécimes de *Cloudina* com reconhecido valor bioestratigráfico (Warren et al. 2011). Sugere-se assim idades de deposição para o intervalo fossilífero do Grupo Itapucumi entre 550 e 538.8 Ma (Grotzinger et al., 1995; Linnemann et al. 2018). Acima desta unidade, ocorrem os depósitos pelíticos e carbonatos impuros da Formação Cerro Curuzu, com zircões provenientes de níveis de tufo vulcânico com idades máximas de 498 ± 19 Ma (Warren et al. 2019, Warren et al. 2023), o que sugere, que a porção superior do Grupo Itapucumi, possa apresentar idades que ultrapassem o limite Ediacarano-Cambriano.

Estudos recentes apresentam um quadro sedimentológico e estratigráfico bastante detalhado para a Formação Tagatiya Guazú, com contribuições para a compreensão do modelo deposicional e paleobiológico da unidade (Warren 2011, Warren et al. 2011, 2012, 2013, 2017, 2019). Contudo, além da abundância e excelente qualidade preservacional reconhecida para esta assembleia fóssil, novas observações indicam maior diversidade paleobiológica (incluindo estruturas de bioturbação) do que aquela

anteriormente considerada. Dentro deste escopo, esta tese propõe o estudo paleontológico integrado da Formação Tagatiya Guazú, incluindo a caracterização da diversidade taxonômica de sua assembleia fóssil, seus aspectos tafonômicos e icnológicos. Com ênfase nos sinais paleoecológicos e evolutivos extraídos dos elementos fósseis, buscou-se então preencher algumas lacunas do conhecimento referente à paleobiologia da transição Ediacarano-Cambriano no Gondwana ocidental, oferecendo um recorte das transformações bióticas que marcaram o início do Éon Fanerozoico.

CAPÍTULO 9: CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir, seguem listadas as principais conclusões, advindas da integração dos dados de paleontologia sistemática, sedimentologia, bioestratigrafia, tafonomia e icnologia (estes em sua maior parte apresentados nos Anexos 1 e 2). Dados de geocronologia publicados por Warren et al. (2023), integrados aos dados de paleontologia desta tese também contribuíram para a composição das conclusões de cunho cronoestratigráfico.

1 – O registro fóssil da Formação Tagatiya Guazú apresenta diversidade taxonômica consideravelmente superior aquela até então reconhecida. Além de abundantes espécimes de *Cloudina hartmannae* (anteriormente referida como *C. lucinaoi*), os quais apresentam considerável variação morfológica, foram ainda reconhecidos dois morfotipos de cloudinídeos: *Cloudina* sp. e cf. *Zuunia chimidtsereni*. Carapaças tubulares não cloudinomórficas incluem *Corumbella weneri*, já conhecidos para a unidade, mas também *Sinotubulites* sp. e ao menos um morfotipo, com tubos de parede espessa e seguimentos anelares que não apresentam sinapomorfias típicas de *Sinotubulites* ou *Corumbella*. Curiosamente, *Namacalathus hermanastes*, apesar de localmente reconhecido em associação com outros táxons esqueléticos, parece representar elementos raros na assembleia. Ainda, uma diversidade de formas esqueléticas tubiformes e não-tubiformes não identificadas reforçam a diversidade morfológica e taxonômica das comunidades bentônicas esqueléticas.

2 – Em adição ao registro de fósseis esqueléticos, reporta-se ineditamente a ocorrência de compressões carbonificadas de vendotaeniáceas e outros potenciais morfotipos de macroalgas fósseis. Amplia-se assim, o conhecimento em termos da diversidade taxonômica do paleoecossistema representado pelo registro fóssil da unidade, trazendo informações quanto às comunidades de macroorganismos produtores primários.

3 – Detalhamento faciológico e sedimentológico em face do estudo de novas exposições de rocha anteriormente não estudadas, permitindo refinar as estimativas de espessura da unidade para aproximadamente 35 m, como também ampliar as interpretações relativas ao sistema deposicional.

4 – Neste sentido, a integração dos dados de paleontologia e sedimentologia sugerem que boa parte da sucessão dominada por fácies microbialíticas, provavelmente

se desenvolveram em zonas permanentemente alagadas da plataforma, em contexto de submaré rasa, porém em contexto de águas calmas.

5 – Em termos dos controles faciológicos e diagenéticos para a preservação e distribuição vertical e lateral das associações fósseis, a caracterização tafofaciológica sugere a interação de processos de rápido soterramento (associados a eventos episódicos de tempestade) e processos de precoce calcitização, como principais fatores responsáveis pela preservação da assembleia fóssil esquelética. Em termos da preservação de macroalgas, reporta-se uma janela tafonômica adicional na unidade, associada a rápida sedimentação de material terrígeno, em provável contexto redutor, com o potencial de preservação de organismos de corpo mole.

6 – Reconhecimento e caracterização de estruturas de bioturbação restritas ao intervalo superior da unidade, os quais representam em sua maioria estruturas de locomoção e/ou alimentação. Ao todo foram descritos 6 icnogêneros, incluindo *Bergaueria* isp., cf. *Skolithos* isp., *Palaeophycus* isp., *Planolites* isp., *Treptichnus* isp., *Streptichnus* isp. além de estruturas de base bilobadas, referidas como rusophyciformes e escavações com padrões inconsistentes, que não puderam ser acomodadas em categorias preestabelecidas.

7 – A caracterização da distribuição faciológica e estratigráfica dos fósseis e icnofósseis permitiu ainda fazer inferências quanto ao significado paleoecológico e bioestratigráfico da assembleia fóssil. A primeira sugerindo potenciais preferências por regiões protegidas da zona de submaré, com maiores batimetrias e maior estabilidade ambiental, e a segunda indicando que, ao menos o topo da unidade, deve corresponder em idade à base do Cambriano.

8 – Em termos macroevolutivos, no contexto da passagem Ediacarano-Cambriano, o registro fóssil da unidade parece refletir o caráter transicional das mudanças bióticas típicas desse intervalo. Sugere-se que a sobreposição parcial de consituíntes esqueléticas (representantes de estilos ecológicos típicos do Ediacarano Terminal) e de estruturas de bioturbação (produzidas por organismos bilatérios vágeis, tipo-Cambrianos) seja indicativa de uma substituição biótica segundo modelo da dupla cunha truncada (*sensu* Linnemann et al. 2019).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allison, P.A., Briggs, D.E.G., 1991. Taphonomy of non-mineralized tissues, in: Allison, P.A., Briggs, D.E.G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Plenum Press, New York, pp. 25–70.
- Álvaro, J.J., Cortijo, I., Jensen, S., Martí, M., Palacios, T., 2020. Cloudina-microbial reef resilience to substrate instability in a Cadomian retro-arc basin of the Iberian Peninsula. *Precambrian Res.* 336, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105479>
- Amorim, K.B., Afonso, J.W.L., Leme, J. de M., Diniz, C.Q.C., Rivera, L.C.M., Gómez-Gutiérrez, J.C., Boggiani, P.C., Trindade, R.I.F., 2020. Sedimentary facies, fossil distribution and depositional setting of the late Ediacaran Tamengo Formation (Brazil). *Sedimentology* 67, 3422–3450. <https://doi.org/10.1111/sed.12749>
- Amthor, Joachim E., Grotzinger, J.P., Schröder, S., Bowring, S.A., Ramezani, J., Martin, M.W., Matter, A., 2003. Extinction of Cloudina and Namacalathus at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. *Geology* 31, 431–434. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2)
- Amthor, Joachim E., Grotzinger, J.P., Schröder, S., Bowring, S.A., Ramezani, J., Martin, M.W., Matter, A., 2003. Extinction of Cloudina and Namacalathus at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. *Geology* 31, 431–434. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2)
- Anderson, R.P., Tosca, N.J., Cinque, G., Frogley, M.D., Lekkas, I., Akey, A., Hughes, G.M., Bergmann, K.D., Knoll, A.H., Briggs, D.E.G., 2020. Aluminosilicate haloes preserve complex life approximately 800 million years ago. *Interface Focus* 10. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2020.0011>
- Anderson, R.P., Tosca, N.J., Gaines, R.R., Koch, N.M., Briggs, D.E.G., 2018. A mineralogical signature for Burgess Shale-type fossilization. *Geology* 46, 347–350. <https://doi.org/10.1130/G39941.1>
- Anderson, R.P., Tosca, N.J., Saupe, E.E., Wade, J., Briggs, D.E.G., 2021. Early formation and taphonomic significance of kaolinite associated with Burgess Shale fossils. *Geology* 49, 355–359. <https://doi.org/10.1130/G48067.1>
- Ayyat, A.M. El, 2015. Modes of origin and genetic pathways of peloids within the Duwi Formation (late Cretaceous) in Eastern and Western deserts of Egypt : A petrologic perspective. *Sediment. Geol.* 318, 20–39. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.12.005>
- Babcock, L.E., Grunow, A.M., Sadowski, G.R., Leslie, S.A., 2005. Corumbella, an Ediacaran-grade organism from the Late Neoproterozoic of Brazil. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 220, 7–18.

<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2003.01.001>

- Babcock, L.E., Peng, S., Zhu, M., Xiao, S., Ahlberg, P., 2014. Proposed reassessment of the Cambrian GSSP. *J. African Earth Sci.* 98, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.06.023>
- Batchelor, M.T., Burne, R. V., Henry, B.I., Li, F., Paul, J., 2018. A biofilm and organomineralisation model for the growth and limiting size of ooids. *Sci. Rep.* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18908-4>
- Becker-Kerber, B., Abd Elmola, A., Zhuravlev, A., Gaucher, C., Simões, M.G., Prado, G.M.E.M., Gámez Vintaned, J.A., Fontaine, C., Lino, L.M., Ferreira Sanchez, D., Galante, D., Paim, P.S.G., Callefo, F., Kerber, G., Meunier, A., El Albani, A., 2021. Clay templates in Ediacaran vendotaeniaceans: Implications for the taphonomy of carbonaceous fossils. *GSA Bull.* 1–13. <https://doi.org/10.1130/b36033.1>
- Becker-Kerber, B., Liza, M., Forancelli, A., Rudnitzki, I.D., Galante, D., Rodrigues, F., Leme, J.D.M., 2017. Ecological interactions in Cloudina from the Ediacaran of Brazil : implications for the rise of animal biomineralization. *Sci. Rep.* 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05753-8>
- Behrensmeyer, A.K., Kidwell, S.M., 1985. Taphonomy ' s Contributions to Paleobiology. *Paleobiology* 11, 105–119.
- Bertling, M., Braddy, S.J., Bromley, R.G., Demathieu, G.R., Nielsen, J.A.N.K., Nielsen, K.S.S., Rindsberg, A.K., Genise, J., Mikula, R., 2006. Names for trace fossils : a uniform approach. *Lethaia* 39, 265–286. <https://doi.org/10.1080/00241160600787890>
- Bottjer, D.J., Clapham, M.E., 2006. Evolutionary Paleoeology of Ediacaran Benthic Marine Animals, in: Xiao, S., Kaufman, A.J. (Eds.), *Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology*. Springer, Dordrecht.
- Bowring, S.A., Grotzinger, J.P., Condon, D.J., Ramezani, J., Newall, M.J., Allen, P.A., 2007. Geochronologic constraints on the chronostratigraphic framework of the Neoproterozoic Huqf Supergroup, Sultanate of Oman. *Am. J. Sci.* 307, 1097–1145. <https://doi.org/10.2475/10.2007.01>
- Brasier, M.D., Cowie J., Taylor, M., 1994. Decision on the Precambrian-Cambrian boundary stratotype. *EPISODES* 17, 3–7.
- Brett, C.E., Baird, G.C., 1986. Comparative Taphonomy : A key to Paleoenvironmental Interpretation Based on Fossil Preservation. *Palaios* 1, 207–227.
- Bromley, R.G., 1990. *Trace Fossils: Biology and taphonomy*, 1st ed. Unwyn

Hyman Ltd., London.

- Buatois, L.A., 2018. *Treptichnus pedium* and the Ediacaran-Cambrian boundary: Significance and caveats. *Geol. Mag.* 155, 174–180.
<https://doi.org/10.1017/S0016756817000656>
- Buatois, L.A., Gabriela Mángano, M., 2013. Ichnodiversity and Ichnodisparity: significance and caveats. *Lethaia* 46, 281–292.
<https://doi.org/10.1111/let.12018>
- Buatois, L.A., Gingras, M.K., MacEachern, J., Mangano, M.G., Zonneveld, J.-P., Pemberton, S.G., 2005. Colonization of Brackish-Water Systems through Time : Evidence from the Trace-Fossil Record. *Palaios* 20, 321–347.
<https://doi.org/10.2110/palo.2004.p04-32>
- Buatois, L.A., Mángano, M.G., 2016. Ediacaran ecosystems and the dawn of animals, in: *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events*. Springer, Dordrecht, pp. 27–72.
- Buatois, L.A., Mángano, M.G., 2011. The Trace-Fossil Record of Organism–Matground Interactions in Space and Time. *Microbial mats in siliciclastic sediments*. *SEPM Spec Pub* 15–28. <https://doi.org/10.2110/sepmsp.101.015>
- Buatois, L.A., Wisshak, M., Wilson, M.A., Mángano, M.G., 2017. Categories of architectural designs in trace fossils: A measure of ichnodisparity. *Earth-Science Rev.* 164, 102–181. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.009>
- Budd, G.E., Jensen, S., 2017. The origin of the animals and a ‘Savannah’ hypothesis for early bilaterian evolution. *Biol. Rev.* 92, 446–473.
<https://doi.org/10.1111/brv.12239>
- Butterfield, N.J., 2003. Exceptional fossil preservation and the Cambrian explosion. *Integr. Comp. Biol.* 43, 166–177.
<https://doi.org/10.1093/icb/43.1.166>
- Butterfield, N.J., 1995. Secular distribution of Burgess-Shale-type preservation. *Lethaia* 28, 1–13. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1995.tb01587.x>
- Cai, Y., Cortijo, I., Schiffbauer, J.D., Hua, H., 2017. Taxonomy of the late Ediacaran index fossil *Cloudina* and a new similar taxon from South China. *Precambrian Res.* 298, 146–156.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.016>
- Cai, Y., Hua, H., Schiffbauer, J.D., Sun, B., Yuan, X., 2014. Tube growth patterns and microbial mat-related lifestyles in the Ediacaran fossil *Cloudina*, Gaojiashan Lagerstätte, South China. *Gondwana Res.* 25, 1008–1018.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.027>
- Cai, Y., Hua, H., Xiao, S., Schiffbauer, J.D., Li, P., 2010. Biostratinomy of the late

- Ediacaran pyritized Gaojiashan Lagerstätte from Southern Shaanxi, South China: Importance of event deposits. *Palaios* 25, 487–506.
<https://doi.org/10.2110/palo.2009.p09-133r>
- Cai, Y., Hua, H., Zhang, X., 2013. Tube construction and life mode of the late Ediacaran tubular fossil *Gaojiashania cyclus* from the Gaojiashan Lagerstätte. *Precambrian Res.* 224, 255–267.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.022>
- Cai, Y., Schiffbauer, J.D., Hua, H., Xiao, S., 2011. Morphology and paleoecology of the late Ediacaran tubular fossil *Conotubus hemiannulatus* from the Gaojiashan Lagerstätte of southern Shaanxi Province, South China. *Precambrian Res.* 191, 46–57.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.002>
- Cai, Y., Xiao, S., Hua, H., Yuan, X., 2015. New material of the biomineralizing tubular fossil *Sinotubulites* from the late Ediacaran Dengying Formation, South China. *Precambrian Res.* 261, 12–24.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.002>
- Cai, Y., Xiao, S., Li, G., Hua, H., 2019. Diverse biomineralizing animals in the terminal Ediacaran Period herald the Cambrian explosion. *Geology* 47, 380–384. <https://doi.org/10.1130/G45949.1>
- Campanha, G.A. da C., Warren, L., Boggiani, P.C., Grohmann, C.H., Cáceres, A.A., 2010. Structural analysis of the Itapucumí Group in the Vallemí region, northern Paraguay: Evidence of a new Brasiliano/Pan-African mobile belt. *J. South Am. Earth Sci.* 30, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2010.04.001>
- Carbone, C., Narbonne, G.M., 2014. When Life Got Smart: The Evolution of Behavioral Complexity Through the Ediacaran and Early Cambrian of NW Canada. *J. Paleontol.* 88, 309–330. <https://doi.org/10.1666/13-066>
- Carbone, C.A., Narbonne, G.M., Macdonald, F.A., Boag, T.H., 2015. New Ediacaran fossils from the uppermost Blue flower Formation, northwest Canada: disentangling biostratigraphy and paleoecology. *J. Paleontol.* 89, 281–291. <https://doi.org/10.1017/jpa.2014.25>
- Chafetz, H.S., 1986. Marine peloids: A product of bacterially induced precipitation of calcite. *J. Sediment. Petrol.* 56, 812–817.
- Chen, Z., Bengston, S., Zhou, C.M., Hua, H., Yue, Z., 2008. Tube structure and original composition of *Sinotubulites*: shelly fossils from the late Neoproterozoic in southern Shaanxi, China. *Lethaia* 41, 37–45.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2007.00040.x>
- Chen, Z., Zhou, C., Xiao, S., Wang, W., Guan, C., Hua, H., Yuan, X., 2014. New

- Ediacara fossils preserved in marine limestone and their ecological implications. *Sci. Rep.* 4, 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep04180>
- Coniglio, M., James, N.P., 1985. Calcified algae as sediment contributors to early Paleozoic limestones: Evidence from deep-water sediments of the Cow Head Group, Western Newfoundland. *J. Sediment. Petrol.* 55, 746–754.
- Cortijo, I., Cai, Y., Hua, H., Schiffbauer, J.D., Xiao, S., 2015. Life history and autecology of an Ediacaran index fossil: Development and dispersal of *Cloudina*. *Gondwana Res.* 28, 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.001>
- Cortijo, I., Mus, M.M., Jensen, S., Palacios, T., 2010. A new species of *Cloudina* from the terminal Ediacaran of Spain. *Precambrian Res.* 176, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.10.010>
- Cribb, Alison T., Kenchington, C.G., Koester, B., Gibson, B.M., Boag, T.H., Racicot, R.A., Mocke, H., Laflamme, M., Darroch, S.A.F., 2019. Increase in metazoan ecosystem engineering prior to the Ediacaran–Cambrian boundary in the Nama Group, Namibia. *R. Soc. Open Sci.* 6. <https://doi.org/10.1098/rsos.190548>
- Cribb, Alison T., Kenchington, C.G., Koester, B., Gibson, B.M., Boag, T.H., Racicot, R.A., Mocke, H., Laflamme, M., Darroch, S.A.F., 2019. Increase in metazoan ecosystem engineering prior to the Ediacaran – Cambrian boundary in the Nama Group , Namibia. *R. Soc. open Sci.* 6, 1–12. <https://doi.org/10.1098/rsos.190548>
- Crimes, T.P., 1975. The production and preservation of trilobite resting and furrowing traces. *Lethaia* 8, 35–48. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1975.tb00914.x>
- Darroch, S.A.F., Boag, T.H., Racicot, R.A., Tweedt, S.M., Mason, S.J., Erwin, D.H., Laflamme, M., 2016. A mixed Ediacaran-metazoan assemblage from the Zaris Sub-basin , Namibia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 459, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.07.003>
- Darroch, S.A.F., Cribb, A.T., Buatois, L.A., Germs, G.J.B., Kenchington, C.G., Smith, E.F., Mocke, H., Neil, G.R.O., Schiffbauer, J.D., Maloney, K.M., Racicot, R.A., Turk, K.A., Gibson, B.M., Almond, J., Koester, B., Boag, T.H., Tweedt, S.M., Laflamme, M., 2021. The trace fossil record of the Nama Group , Namibia : Exploring the terminal Ediacaran roots of the Cambrian explosion. *Earth-Science Rev.* 212, 103435. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103435>
- Desjardins, P.R., Buatois, L.A., Mángano, M.G., 2012. Tidal Flats and Subtidal Sand Bodies, Developments in Sedimentology.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53813-0.00018-6>

- Desjardins, P.R., Gabriela Mángano, M., Buatois, L.A., Pratt, B.R., 2010. Skolithos pipe rock and associated ichnofabrics from the southern Rocky Mountains, Canada: Colonization trends and environmental controls in an early Cambrian sand-sheet complex. *Lethaia* 43, 507–528.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2009.00214.x>
- Diniz, C.Q.C., Leme, J.D.M., Boggiani, P.C., 2021. New Species of Macroalgae from Tamengo Formation, Ediacaran, Brazil. *Front. Earth Sci.* 9, 1–11.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.748876>
- Dornbos, S.Q., Oji, T., Kanayama, A., Gonchigdorj, S., 2016. A new Burgess Shale-type deposit from the Ediacaran of western Mongolia. *Sci. Rep.* 6, 1–5. <https://doi.org/10.1038/srep23438>
- Droser, M.L., Gehling, J.G., 2008. Synchronous aggregate growth in an abundant new ediacaran tubular organism. *Science* (80-.). 319, 1660–1662.
<https://doi.org/10.1126/science.1152595>
- Ebbestad, J.O.R., Hybertsen, F., Höglström, A.E.S., Jensen, S., Palacios, T., Taylor, W.L., Agi, H., 2021. Distribution and correlation of Sabellidites cambriensis (Annelida?) in the basal Cambrian on Baltica. *Geol. Mag.* 1–22.
<https://doi.org/10.1017/S0016756821001187> Received:
- Ellis, J., Cummings, V., Hewitt, J., Thrush, S., Norkko, A., 2002. Determining effects of suspended sediment on condition of a suspension feeding bivalve (*Atrina zelandica*): Results of a survey, a laboratory experiment and a field transplant experiment. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 267, 147–174.
[https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(01\)00355-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(01)00355-0)
- Evans, S.D., Diamond, C.W., Droser, M.L., Lyons, T.W., 2018. Dynamic oxygen and coupled biological and ecological innovation during the second wave of the Ediacara Biota. *Emerg. Top. Life Sci.* 2, 223–233.
<https://doi.org/10.1042/ETLS20170148>
- Gaines, R.R., 2014. Burgess Shale-type Preservation and its Distribution in Space and Time. *Paleontol. Soc. Pap.* 20, 123–146.
<https://doi.org/10.1017/s1089332600002837>
- Geyer, G., Landing, E.D., 2017. The Precambrian – Phanerozoic and Ediacaran – Cambrian boundaries : a historical approach to a dilemma, in: Brasier, M.D., McIlroy, D., McLoughlin, N. (Eds.), *Earth System Evolution and Early Life: A Celebration of the Work of Martin Brasier*. Geological Society, London, pp. 311–349.
- Gingras, M.K., McEachern, J.A., 2012. Tidal Ichnology of Shallow-Water Clastic Settings, in: Davies, R.A., Dalrymple, R.W. (Eds.), *Principles of Tidal*

- Sedimentology. Springer Science & Business Media, pp. 57–77.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6>
- Ginsburg, R.N., Planavsky, N.J., 2008. Diversity of bahamian microbialite substrates. *Mod. Approaches Solid Earth Sci.* 4, 177–195.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8306-8_6
- Glaessner, M.F., 1976. Early Phanerozoic annelid worms and their geological and biological significance. *J. Geol. Soc. London* 132, 259–275.
- Grant, S.W.F., 1990. Shell structure and distribution of *Cloudina*, a potential index fossil for terminal Proterozoic. *Am. J. Sci.* 290A, 261–294.
- Grotzinger, J.P., Bowring, S.A., Saylor, B.Z., Kaufman, A.J., 1995. Biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal evolution. *Science* (80-.). 270. <https://doi.org/10.1126/science.270.5236.598>
- Grotzinger, J.P., James, N.P., 2000. Precambrian Carbonates: Evolution of Understanding, in: *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World*. SEPM special publication, pp. 3–20.
<https://doi.org/10.2110/pec.00.67.0003>
- Grotzinger, J.P., Watters, W.A., Knoll, A.H., 2000. Calcified metazoans in thrombolite-stromatolite reefs of the terminal Proterozoic Nama Group , Namibia. *Paleobiology* 26, 334–359.
- Hammersburg, S.R., Hasiotis, S.T., Robinson, R.A., 2018. Ichnotaxonomy of the Cambrian Spence Shale Member of the Langston Formation, Wellsville Mountains, Northern Utah, USA. *Paleontol. Contrib.* 20, 1–66.
- Han, J., Cai, Y., Schiffbauer, J.D., Hua, H., Wang, X., Yang, X., Uesugi, K., Komiya, T., Sun, J., 2017. A *Cloudina*-like fossil with evidence of asexual reproduction from the lowest Cambrian , South China. *Geol. Mag.* 154, 1294–1305. <https://doi.org/10.1017/S0016756816001187>
- Harper, B.B., Puga-Bernabe, A., Droxler, A.W., Webster, J.M., Gischler, E., Tiwari, M., Lado-insua, T., Thomas, A.L., Morgan, S., Jovane, L., Röhl, U., 2015. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation along the Great Barrier Reef upper slope: a challenge of the reciprocal sedimentation model. *J. Sediment. Res.* 85, 1019–1036.
- Harris, P.M., Saller, A.H., 1999. Subsurface expression of the Capitan depositional system and implications for hydrocarbon reservoirs, Northeastern Delaware Basin, in: Saller, A.H., Harris, P.M., Kirkland, B.L., Mazzullo, S.J. (Eds.), *Geological Framework of the Capitan Reef*. SEPM special publication, Tulsa, Oklahoma, pp. 37–49.
<https://doi.org/10.2110/pec.99.65.0037>

- Hodgin, E.B., Nelson, L.L., Wall, C.J., Barrón-díaz, A.J., Webb, L.C., Schmitz, M.D., Fike, D.A., Hagadorn, J.W., Smith, E.F., 2021. A link between rift-related volcanism and end-Ediacaran extinction ? Integrated chemostratigraphy , biostratigraphy , and U-Pb geochronology from Sonora , Mexico 49, 115–119.
- Hua, H., Chen, Z., Yuan, X., Zhang, L., Xiao, S., 2005. Skeletogenesis and asexual reproduction in the earliest biomineralizing animal Cloudina. *Geology* 277–280. <https://doi.org/10.1130/G21198.1>
- Hua, H., Pratt, B.R., Zhang, L.Y., 2003. Borings in Cloudina shells: Complex predator-prey dynamics in the terminal neoproterozoic. *Palaios* 18, 454–459. [https://doi.org/10.1669/0883-1351\(2003\)018<0454:BICSCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1669/0883-1351(2003)018<0454:BICSCP>2.0.CO;2)
- Jahnert, R.J., Collins, L.B., 2013. Controls on microbial activity and tidal flat evolution in Shark Bay, Western Australia. *Sedimentology* 60, 1071–1099. <https://doi.org/10.1111/sed.12023>
- Jahnert, R.J., Collins, L.B., 2012. Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia. *Mar. Geol.* 303–306, 115–136. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.02.009>
- Jahnert, R.J., Collins, L.B., 2011. Significance of subtidal microbialites in sharkbay. *Mar. Geol.* 286, 106–111.
- Jensen, S., 1997. Trace fossils from the Lower Cambrian Trace fossils from the Lower Cambrian Mickwitzia sandstone, south-central Sweden. *Foss. Strat.* 42, 1–110.
- Jensen, S., 1989. Predation by early Cambrian trilobites on infaunal worms - evidence from the Swedish Mickwitzia Sandstone. *Lethaia* 23, 29–42.
- Jensen, S., Mens, K., 2001. Trace fossils Didymaulichnus cf. tirasensis and Monomorphichnus isp. from the Estonian Lower Cambrian, with a discussion on the early Cambrian ichnocoenoses of Baltica, in: *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*. Estonian Academy Publishers, pp. 75–85.
- Jensen, S., Runnegar, B.N., 2005. A complex trace fossil from the Spitskop Member (terminal Ediacaran–? Lower Cambrian) of southern Namibia. *Geol. Mag.* 142, 561–569. <https://doi.org/10.1017/S0016756805000853>
- Jensen, S., Runnegar, B.N., 2005. A complex trace fossil from the Spitskop Member (terminal Ediacaran–? Lower Cambrian) of southern Namibia. *Geol. Mag.* 142, 561–569. <https://doi.org/10.1017/S0016756805000853>
- Jensen, S., Saylor, B.Z., Gehling, J.G., Germs, G.J.B., 2000. Complex trace fossils from the terminal Proterozoic of Namibia. *Geology* 28, 143–146.

- Kazmierczak, J., Goldring, R., 1978. Subtidal flat-pebble conglomerate from the Upper Devonian of Poland: a multiprovenant high-energy product. *Geol. Mag.* 115, 359–366.
- Kerans, C., Tinker, S.W., 1997. Sequence stratigraphy and characterization of carbonate reservoirs. SEPM, Tulsa, Oklahoma.
- Kesidis, G., Budd, G.E., Oren, S., 2018. An intermittent mode of formation for the trace fossil *Cruziana* as a serial repetition of *Rusophycus* : the case of *Cruziana tenella* (Linnarsson 1871) Description of *Cruziana tenella* *Cruziana tenella* is a small bilobed trace fossil that.
<https://doi.org/10.1111/let.12303>
- Kesidis, G., Slater, B.J., Jensen, S., Budd, G.E., 2019. Caught in the act: Priapulid burrowers in early Cambrian substrates. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 286, 1–8.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2505>
- Kicklighter, C.E., Hay, M.E., 2007. To avoid or deter : interactions among defensive and escape strategies in sabellid worms. *Behav. Ecol.* 151, 161–173. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0567-0>
- Kirtley, D. V, Tanner, W.F., 1968. Sabellarid worms: Builders of major reef type. *J. Sediment. Petrol.* 38, 1–6.
- Knaust, D., Thomas, R.D.K., Curran, H.A., 2018. *Skolithos linearis* Haldeman, 1840 at its early Cambrian type locality, Chickies Rock, Pennsylvania: Analysis and designation of a neotype. *Earth-Science Rev.* 185, 15–31.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.009>
- Knoll, A.H., 2003. Biomineralization and Evolutionary History. *Rev. Mineral. Geochemistry* 54, 329–356.
- Laflamme, M., Darroch, S.A.F., Tweedt, S.M., Peterson, K.J., Erwin, D.H., 2013. The end of the Ediacara biota: Extinction , biotic replacement, or Cheshire Cat ? *Gondwana Res.* 23, 558–573.
- Laing, B., Laing, B.A., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Narbonne, G.M., 2018. Gyrolithes from the Ediacaran-Cambrian boundary section in Fortune Head , Newfoundland , Canada : Exploring the onset of complex burrowing Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology Gyrolithes from the Ediacaran-Cambrian boundary section in Fortu. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 0–1.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.01.010>
- Landing, E., Geyer, G., Brasier, M.D., Bowring, S.A., 2013. Cambrian Evolutionary Radiation : Context , correlation , and chronostratigraphy — Overcoming deficiencies of the first appearance datum (FAD) concept. *Earth Sci. Rev.* 123, 133–172. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.008>

- Landing, E.D., Myrow, P., Benus, A.P., Narbonne, G.M., 1989. The Placentian Series: Appearance of the oldest skeletalized faunas in Southern Newfoundland. *J. Paleontol.* 63, 739–769.
- Lasemi, Y., Jahani, D., Amin-Rasouli, H., Lasemi, Z., 2012. Ancient Carbonate Tidalites, in: Davies, R.A., Dalrymple, R.W. (Eds.), *Principles of Tidal Sedimentology*. Springer Science & Business Media, pp. 1–621.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6>
- Lawrence, D., 1971. The nature and structure of paleoecology. *J. Paleontol.* 45, 593–607.
- Lendzion, K., 1986. Sedimentation of the Vendian-Cambrian marine sequence, Poland. *Geol. Mag.* 123, 361–365.
- Linnemann, U., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Gärtner, A., Hautmann, M., Geyer, G., Rich, T., Plessen, B., Hofmann, M., Zieger, J., Krause, R., Kriesfeld, L., Smith, J., 2018. New high - resolution age data from the Ediacaran – Cambrian boundary indicate rapid , ecologically driven onset of the Cambrian explosion. *Terra Nov.* 1–10.
<https://doi.org/10.1111/ter.12368>
- Linnemann, U., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Gärtner, A., Hautmann, M., Geyer, G., Vickers-Rich, P., Rich, T., Plessen, B., Hofmann, M., Zieger, J., Krause, R., Kriesfeld, L., Smith, J., 2019. New high-resolution age data from the Ediacaran–Cambrian boundary indicate rapid, ecologically driven onset of the Cambrian explosion. *Terra Nov.* 31, 49–58.
<https://doi.org/10.1111/ter.12368>
- Maloof, A.C., Porter, S.M., Moore, J.L., Dudás, F.Ö., Bowring, S.A., Higgins, J.A., Fike, D.A., Eddy, M.P., 2010. The earliest Cambrian record of animals and ocean geochemical change. *GSA Bull.* 122, 1731–1774.
<https://doi.org/10.1130/B30346.1>
- Mangano, M.G., Buatois, L.A., 2014. Decoupling of body-plan diversification and ecological structuring during the Ediacaran-Cambrian transition : Evolutionary geobiological feedbacks Decoupling of body-plan diversification and ecological structuring during the Ediacaran – Cambrian transitio. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0038>
- Mángano, M.G., Buatois, L.A., 2020a. The rise and early evolution of animals: where do we stand from a trace-fossil perspective? *Interface Focus* 10.
<https://doi.org/10.1098/rsfs.2019.0103>
- Mángano, M.G., Buatois, L.A., 2020b. The rise and early evolution of animals: where do we stand from a trace-fossil perspective? *Interface Focus* 10, 20190103. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2019.0103>

- Mángano, M.G., Buatois, L.A., 2017. The Cambrian revolutions: Trace-fossil record, timing, links and geobiological impact. *Earth-Science Rev.* 173, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.08.009>
- Mángano, M.G., Buatois, L.A., 2015. The Trace-fossil Record of Tidal Flats Through the Phanerozoic : Evolutionary Innovations and Faunal Turnover. *ICHNIA III* 9, 157–177.
- Mángano, M.G., Buatois, L.A., 2014a. Decoupling of body-plan diversification and ecological structuring during the Ediacaran-Cambrian transition: Evolutionary and geobiological feedbacks. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 281. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0038>
- Mángano, M.G., Buatois, L.A., 2014b. Decoupling of body-plan diversification and ecological structuring during the Ediacaran – Cambrian transition : evolutionary and geobiological feedbacks. *Proc. R. Soc. B* 281. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0038>
- Mángano, M.G., Buatois, L.A., MacNaughton, R.B., Jensen, S., Gougeon, R., Marcos, A., Meek, D., Piñuela, L., García-Ramos, J.C., 2022. The Psammichnites-Taphrhelminthopsis conundrum: Implications for Calibrating the Cambrian explosion. *Earth-Science Rev.* 227, 103971. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103971>
- Martinsson, A., 1965. Aspects of a Middle Cambrian Thanatotope on Öland. *Geol. Föreningen i Stock. Förhandlingar* 87, 181–230. <https://doi.org/10.1080/11035896509448903>
- Martynov, A.V., Korshunova, T.A., 2022. Renewed perspectives on the sedentary-pelagic last common bilaterian ancestor. *Contrib. to Zool.* 91, 285–352. <https://doi.org/10.1163/18759866-bja10034>
- McIlroy, D., Brasier, M.D., 2016. Ichnological evidence for the Cambrian explosion in the Ediacaran to Cambrian succession of Tanafjord, Finnmark, northern Norway. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 448, 351–368. <https://doi.org/10.1144/SP448.7>
- Merz, R., 1984. Self-Generated versus Environmentally Produced Feeding Currents : A Comparison for the Sabellid Polychaete *Eudistylia vancouveri*. *Biol. Bull.* 167, 200–2009. <https://doi.org/10.2307/1541348>
- Merz, R.A., 2015. Textures and traction how tube-dwelling polychaetes get a leg up. *Invertebr. Biol.* 134, 61–77.
- Miller, M.F., Smail, S.E., 1997. A Semiquantitative Field Method for Evaluating Bioturbation on Bedding Planes. *Palaaios* 12, 391–396.
- Min, X., Hua, H., Cai, Y., Sun, B., 2019a. Asexual reproduction of tubular fossils

- in the terminal Neoproterozoic Dengying Formation, South China. *Precambrian Res.* 322, 18–23.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.12.009>
- Min, X., Hua, H., Liu, L., Sun, B., Cui, Z., Jiang, T., 2019b. Phosphatized Epiphyton from the terminal Neoproterozoic and its significance. *Precambrian Res.* 331, 105358.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105358>
- Minter, N.J., Buatois, Luis A, Mángano, M.G., 2016. The Conceptual and Methodological Tools of Ichnology The Conceptual and Methodological Tools of Ichnology, in: Mángano, M.G., Buatois, Luis Alberto (Eds.), *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events*. Springer Science & Business Media Dordrecht, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9600-2>
- Moczyłowska, M., Westall, F., Foucher, F., 2014. Microstructure and Biogeochemistry of the Organically Preserved Ediacaran Metazoan Sabellidites. *J. Paleontol.* 88, 224–239. <https://doi.org/10.1666/13-003>
- Morris, S.C., 2006. Darwin’s dilemma: The realities of the Cambrian “explosion.” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 361, 1069–1083.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1846>
- Murdock, D.J.E., 2020. The ‘biomineralization toolkit’ and the origin of animal skeletons. *Biol. Rev.* 44. <https://doi.org/10.1111/brv.12614>
- Muscente, A.D., Bykova, N., Boag, T.H., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Eleish, A., Prabhu, A., Pan, F., Meyer, M.B., Schiffbauer, J.D., Fox, P., Hazen, R.M., Knoll, A.H., 2019. Ediacaran biozones identified with network analysis provide evidence for pulsed extinctions of early complex life. *Nat. Commun.* 10, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08837-3>
- Narbonne, G.M., Aitken, J.D., 1990. Ediacaran fossils from the Sekwi Brook area, Mackenzie Mountains, northwestern Canada. *Paleontology* 33, 945–980.
- Nelson, L.L., Ramezani, J., Almond, J.E., Darroch, S.A.F., Taylor, W.L., Brenner, D.C., Furey, R.P., Turner, M., Smith, E.F., 2022. Pushing the boundary : A calibrated Ediacaran-Cambrian stratigraphic record from the Nama Group in northwestern Republic of South Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.* 580, 117396. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117396>
- Neto de Carvalho, C., Paredes, R., 2023. The possible actiniarian sea anemone burrow *Bergaueria hemispherica* from the Pliensbachian (Lower Jurassic) of the Lusitanian Basin (Central Portugal) . *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 522. <https://doi.org/10.1144/sp522-2022-7>

- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T., Krumbein, W.E., 2001. Microbially induced sedimentary structures indicating climatological, Hydrological and depositional conditions within recent and pleistocene coastal facies zones (Southern Tunisia). *Facies* 44, 23–30. <https://doi.org/10.1007/BF02668164>
- Oliveira, R.S. de, Nogueira, A.C.R., Romero, G.R., Truckenbrodt, W., da Silva Bandeira, J.C., 2019. Ediacaran ramp depositional model of the Tamengo Formation, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 96. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102348>
- Osés, G.L., Romero, R., Pfeiffer, F., Alves, L., Wood, R., Romero, G.R., 2022. Ediacaran *Corumbella* has a cataphract calcareous skeleton with controlled biomineralization. *iScience* 25, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105676>
- Osgood, R.G., 1970. Trace fossils of the Cincinnati area. *Paleontogra. Amer.* 41, 281–444.
- Pacheco, M.L.A.F., Galante, D., Rodrigues, F., De, J., 2015. Insights into the Skeletonization, Lifestyle, and Affinity of the Unusual Ediacaran Fossil *Corumbella*. *PLoS One* 10, 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114219>
- Park, T.S., Jung, J., Lee, M., Lee, S., Zhen, Y.Y., Hua, H., Warren, L. V, Hughes, N.C., 2021a. Enduring evolutionary embellishment of cloudinids in the Cambrian. *R. Soc. open Sci.* 8. <https://doi.org/10.1098/rsos.210829>
- Park, T.S., Jung, J., Lee, M., Lee, S., Zhen, Y.Y., Hua, H., Warren, L. V, Hughes, N.C., 2021b. Enduring evolutionary embellishment of cloudinids in the Cambrian. *Royal* 8, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsos.210829>
- Pemberton, S.G., Frey, R.W., 1984. Quantitative methods in ichnology: spatial distribution among populations. *Lethaia* 17, 33–49. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1984.tb00663.x>
- Pemberton, S.G., Frey, R.W., 1982. Trace fossil nomenclature and the *Planolites*-*Palaeophycus* dilemma. *J. Paleontol.* 56, 843–881.
- Peng, S., Babcock, L.E., Cooper, R.A., 2012. The Cambrian Period, in: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M., Ogg, G. (Eds.), *The Geologic Time Scale*. Elsevier, pp. 437–488. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00019-6>
- Penny, A.M., Wood, R., Curtis, A., Bowyer, F., Tostevin, R., 2014. Ediacaran metazoan reefs from the Nama Group, Namibia. *Science* (80-.). 344, 1504–1507.
- Penny, A.M., Wood, R.A., Zhuravlev, A.Y., Bowyer, A.C.F., Tostevin, R., 2016. Intraspecific variation in an Ediacaran skeletal metazoan : *Namacalathus*

- from the Nama Group , Namibia. *Geobiology* 1–13.
<https://doi.org/10.1111/gbi.12205>
- Peters, S.E., Gaines, R.R., 2012. Formation of the ' Great Unconformity' as a trigger for the Cambrian explosion. *Nature* 484, 363–366.
<https://doi.org/10.1038/nature10969>
- Petrov, P.Y., 2016. Molar Tooth Structures and Origin of Peloids in Proterozoic Carbonate Platforms (Middle Riphean of the Turukhansk Uplift , Siberia). *Lithol. Miner. Resour.* 51, 290–309.
<https://doi.org/10.1134/S0024490216040064>
- Poschmann, M., 2015. The corkscrew-shaped trace fossil *Helicodromites* Berger, 1957, from Rhenish Lower Devonian shallow-marine facies (Upper Emsian; SW Germany). *Palaontologische Zeitschrift* 89, 635–643.
<https://doi.org/10.1007/s12542-014-0232-6>
- Pratt, B.R., James, N.P., Cowan, C.A., 1992. Peritidal carbonates, in: *Facies Models: Response to Sea Level Change*. pp. 303–322.
- Sappenfield, A., Droser, M.L., Gehling, J.G., 2011. Problematica, trace fossils, and tubes within the Ediacara Member (South Australia): Redefining the Ediacaran trace fossil record one tube at a time. *J. Paleontol.* 85, 256–265.
- Schiffbauer, J.D., Huntley, J.W., O'Neil, G.R., Darroch, S.A.F., Laflamme, M., Cai, Y., 2016. The Latest Ediacaran Wormworld Fauna: Setting the Ecological Stage for the Cambrian Explosion. *GSA Today* 26, 4–11.
<https://doi.org/10.1130/GSATG265A.1>
- Schiffbauer, J.D., Selly, T., Jacquet, S.M., Merz, R.A., Nelson, L.L., Strange, M.A., Cai, Y., Smith, E.F., 2020. Discovery of bilaterian-type through-guts in cloudinomorphs from the terminal Ediacaran Period. *Nat. Commun.* 11, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13882-z>
- Schlager, W., Ginsburg, R.N., 1981. Bahama carbonate platforms - The deep and the past. *Mar. Geol.* 44, 1–24.
- Seilacher, A., 2007. *Trace Fossil Analysis*. Springer Berlin Heidelberg, New York.
- Seilacher, A., 1999. Biomat-related lifestyles in the Precambrian. *Palaios* 14, 86–93. <https://doi.org/10.2307/3515363>
- Seilacher, A., 1960. Lebensspuren als leitfossilien. *Geol. Rundschau* 49, 41–50.
- Seilacher, A., Buatois, L.A., Mángano, M.G., 2005. Trace fossils in the Ediacaran – Cambrian transition : Behavioral diversification , ecological turnover and environmental shift. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 227, 323–356.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.003>

- Seilacher, A., Pflügger, F., 1994. From biomats to benthic agriculture: A biohistoric revolution, in: Krumbein, W.E., Paterson, D.M., Stal, L.J. (Eds.), *Biostabilization of Sediments*. Bibliotheks und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg, pp. 97–105.
- Selly, T., Schiffbauer, J.D., Jacquet, S.M., Smith, E.F., Nelson, L.L., Andreassen, B.D., Huntley, J.W., Strange, M.A., O'Neil, G.R., Thater, C.A., Bykova, N., Steiner, M., Yang, B., Cai, Y., 2019. A new cloudinid fossil assemblage from the terminal Ediacaran of Nevada, USA. *J. Syst. Palaeontol.* 18, 357–379. <https://doi.org/10.1080/14772019.2019.1623333>
- Sevillano, A., Bádenas, B., Rosales, I., Barnolas, A., López-García, J.M., 2020. Orbital cycles, differential subsidence and internal factors controlling the high-frequency sequence architecture in a Sinemurian shallow carbonate platform (Mallorca Island, Spain). *Sediment. Geol.* 407, 1–20.
- Shahkarami, S., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Hagadorn, J.W., Almond, J., 2020. The Ediacaran–Cambrian boundary: Evaluating stratigraphic completeness and the Great Unconformity. *Precambrian Res.* 345, 105721. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105721>
- Shore, A., Wood, R., 2021. Environmental and diagenetic controls on the morphology and calcification of the Ediacaran metazoan Cloudina. *Sci. Rep.* 22, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90768-5>
- Shore, A., Wood, R., Curtis, A., Bowyer, F., 2020. Multiple branching and attachment structures in cloudinomorphs, Nama Group, Namibia. *Geology* 48, 877–881. <https://doi.org/10.1130/G47447.1>
- Shumway, S.E., Frank, D.M., Ewart, L.M., Ward, J.E., 2003. Effect of yellow loess on clearance rate in seven species of benthic, filter-feeding invertebrates. *Aquac. Res.* 34, 1391–1402. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2003.00958.x>
- Skompski, S., Łuczyński, P., Drygant, D., Kozłowski, W., 2008. High-energy sedimentary events in lagoonal successions of the Upper Silurian of Podolia, Ukraine. *Facies* 54, 277–296. <https://doi.org/10.1007/s10347-007-0133-1>
- Speyer, S.E., Brett, C.E., 1991. Taphofacies controls: Background and episodic processes in fossil assemblage preservation, in: Allison, P.A., Briggs, D.E.G. (Eds.), *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Plenum Press, New York and London, pp. 501–544.
- Suosaari, E.P., Reid, R.P., Mercadier, C., Vitek, B.E., Oehlert, A.M., Stolz, J.F., Giusfredi, P.E., Eberli, G.P., 2022. The microbial carbonate factory of Hamelin Pool, Shark Bay, Western Australia. *Sci. Rep.* 12, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16651-z>

- Suosaari, E.P., Reid, R.P., Oehlert, A.M., Playford, P.E., Steffensen, C.K., Andres, M.S., Suosaari, G. V, Milano, G.R., Eberli, G.P., 2019. Stromatolite provinces of Hamelin Pool: Physiographic controls on stromatolites and associated lithofacies. *J. Sediment. Petrol.* 89, 207–226.
- Tarhan, L.G., Hughes, N.C., Myrow, P.M., Bhargava, O.N., Ahluwalia, A.D., Kudryavtsev, A.B., 2014. Precambrian-Cambrian boundary interval occurrence and form of the enigmatic tubular body fossil *Shaanxilithes ningqiangensis* from the Lesser Himalaya of India. *Palaeontology* 57, 283–298. <https://doi.org/10.1111/pala.12066>
- Taylor, A.M., Goldring, R., 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *J. - Geol. Soc.* 150, 141–148. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0141>
- Topper, T., Betts, M.J., Dorjnamjaa, D., Li, G., Li, L., Altanshagai, G., Enkhbaatar, B., Skovsted, C.B., 2022. Locating the BACE of the Cambrian : Bayan Gol in southwestern Mongolia and global correlation of the Ediacaran – Cambrian boundary. *Earth-Science Rev.* 229, 104017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104017>
- Tostevin, R., Wood, R.A., Shields, G.A., Poulton, S.W., Guilbaud, R., Bowyer, F., Penny, A.M., He, T., Curtis, A., Hoffmann, K.H., Clarkson, M.O., 2016. Low-oxygen waters limited habitable space for early animals. *Nat. Commun.* 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms12818>
- Tucker, M.E., 1985. Shallow-marine carbonate facies and facies models. *Sedimentol. Recent Dev. Appl. Asp.* 147–169. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1985.018.01.08>
- Turk, K.A., Maloney, K.M., La, M., Darroch, S.A.F., 2022a. Paleontology and ichnology of the late Ediacaran Nasep – Huns transition (Nama Group, southern Namibia). *J. Paleontol.* 96, 753–769. <https://doi.org/10.1017/jpa.2022.31>
- Turk, K.A., Maloney, K.M., Laflamme, M., Darroch, S.A.F., 2022b. Paleontology and ichnology of the late Ediacaran Nasep – Huns transition (Nama Group, southern Namibia). *J. Paleontol.* 1–17. <https://doi.org/10.1017/jpa.2022.31>
- Van Iten, H., Leme, J.M., Pacheco, M.L., Simoes, M.G., Fairchild, T.R., Rodrigues, F., Galante, D., Boggiani, P.C., Marques, A.C., 2016. Origin and early diversification of the phylum Cnidaria: key macrofossils from the Ediacaran System of North and South America, in: Goffredo, S., Dubinsky, Z. (Eds.), *The Cnidaria , Past , Present and Future - The World of Medusa and Her Sisters*. Springer, pp. 31–40. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31305-4>

- Vannier, J., Calandra, I., Gaillard, C., Zylńska, A., 2010. Priapulid worms : Pioneer horizontal burrowers at the Precambrian- Cambrian boundary. *Geology* 38, 711–714. <https://doi.org/10.1130/G30829.1>
- Varejão, F.G., Warren, L.V., Simões, M.G., Cerri, R.I., Alessandretti, L., Santos, M.G.M., Assine, M.L., 2022. Evaluation of distinct soft-sediment deformation triggers in mixed carbonate-siliciclastic systems : Lessons from the Brazilian Pre-Salt analogue Crato Formation (Araripe Basin , NE Brazil). *Mar. Pet. Geol.* 140, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105673>
- Vidal, G., Palacios, T., Gámez-Vintaned, J.A., Balda, M.A.D., Grant, S.W.F., 1994. Neoproterozoic-early Cambrian geology and palaeontology of Iberia. *Geol. Mag.* 131, 729–765. <https://doi.org/10.1017/S001675680001284X>
- Vinn, O., Zatoń, M., 2012. Inconsistencies in proposed annelid affinities of early biomineralized organism Cloudina (Ediacaran): Structural and ontogenetic evidences. *Carnets Geol.* 03, 39–47. <https://doi.org/10.4267/2042/46095>
- Waggoner, B., 2003. The Ediacaran Biotas in Space and Time. *Integr. Comp. Biol.* 113, 104–113.
- Walde, D.H., Weber, B., Erdtmann, B.-D., Steiner, M., 2019. Taphonomy of *Corumbella weneri* from the Ediacaran of Brazil : sinotubulitid tube or conulariid test? *Alcheringa An Australas. J. Palaeontol.* 43, 335–350. <https://doi.org/10.1080/03115518.2019.1615551>
- Wan, B., Tang, Q., Pang, K., Wang, X., Bao, Z., Meng, F., 2019. Repositioning the Great Unconformity at the southeastern margin of the North China Craton. *Precambrian Res.* 324, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.01.014>
- Wang, X., Zhang, X., Zhang, Y., Cui, L., Li, L., 2021. New materials reveal Shaanxilithes as a Cloudina -like organism of the late Ediacaran. *Precambrian Res.* 362, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106277>
- Warren, Lucas Veríssimo, Quaglio, F., Simões, M.G., Gaucher, C., Riccomini, C., Poiré, D.G., Freitas, B.T., Boggiani, P.C., Sial, A.N., 2017a. Cloudina-Corumbella-Namacalathus association from the Itapucumi Group, Paraguay: Increasing ecosystem complexity and tiering at the end of the Ediacaran. *Precambrian Res.* 298, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.003>
- Warren, Lucas Veríssimo, Quaglio, F., Simões, M.G., Gaucher, C., Riccomini, C., Poiré, D.G., Freitas, B.T., Boggiani, P.C., Sial, A.N., 2017b. Cloudina - Corumbella - Namacalathus association from the Itapucumi Group , Paraguay : increasing ecosystem complexity ... *Precambrian Res.* <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.003>

- Warren, L. V., Fairchild, T.R., Gaucher, C., Boggiani, P.C., Poiré, D.G., Anelli, L.E., Inchausti, J.C.G., 2011. *Corumbella* and in situ *Cloudina* in association with thrombolites in the Ediacaran Itapucumi Group, Paraguay. *Terra Nov.* 23, 382–389. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.01023.x>
- Warren, L. V., Pacheco, M.L.A.F., Fairchild, T.R., Simões, M.G., Riccomini, C., Boggiani, P.C., Cáceres, A.A., 2012. The dawn of animal skeletogenesis: Ultrastructural analysis of the Ediacaran metazoan *Corumbella weneri*. *Geology* 40, 691–694. <https://doi.org/10.1130/G33005.1>
- Warren, L. V., Quaglio, F., Simões, M.G., Gaucher, C., Riccomini, C., Poiré, D.G., Freitas, B.T., Boggiani, P.C., Sial, A.N., 2017. *Cloudina* - *Corumbella* - *Namacalathus* association from the Itapucumi Group, Paraguay : increasing ecosystem complexity. *Precambrian Res.* 298, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.003>
- Warren, L. V., Simões, M.G., Fairchild, T.R., Riccomini, C., Gaucher, C., Anelli, L.E., Freitas, B.T., Boggiani, P.C., Quaglio, F., 2013. Origin and impact of the oldest metazoan bioclastic sediments. *Geology* 41, 507–510. <https://doi.org/10.1130/G33931.1>
- Warren, L. V., Freitas, B.T., Riccomini, C., Boggiani, P.C., Quaglio, F., Simões, M.G., Fairchild, T.R., Giorgioni, M., Gaucher, C., Poiré, D.G., Cáceres, A.A., Sial, A.N., 2019. Sedimentary evolution and tectonic setting of the Itapucumi Group, Ediacaran, northern Paraguay: From Rodinia break-up to West Gondwana amalgamation. *Precambrian Res.* 322, 99–121. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.12.022>
- Warren, L. V., Inglez, L., Xiao, S., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Okubo, J., Alessandretti, L., Simões, M.G., Riccomini, C., Antunes, G.C., Cerri, R.I., Bahniuk, A.R., Cáceres, A.A., 2023. Evolutionary, paleoecological, and biostratigraphic implications of the Ediacaran-Cambrian interval in West Gondwana. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1–10. <https://doi.org/10.1130/B36732.1/5800194/b36732.pdf>
- Weber, B., Steiner, M., Zhu, M.Y., 2007. Precambrian-Cambrian trace fossils from the Yangtze Platform (South China) and the early evolution of bilaterian lifestyles. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 254, 328–349. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.021>
- Wiens, F., 1986. Zur lithostratigraphischen, petrographischen und strukturellen Entwicklung des Rio Apa-Hochlandes, Nordost-Paraguay. *Technischen Universität Clausthal*.
- Wilson, J.L., 1967. Cyclic and Reciprocal Sedimentation in Virgilian Strata of Southern New Mexico. *GSA Bull.* 78, 805–818.

- Wood, R., Curtis, A., 2014. Extensive metazoan reefs from the Ediacaran Nama Group, Namibia : the rise of benthic suspension feeding. *Geobiology*. <https://doi.org/10.1111/gbi.12122>
- Wood, R., Curtis, A., Penny, A., Zhuravlev, A.Y., Curtis-walcott, S., Liping, S., Bowyer, F., 2017a. Flexible and responsive growth strategy of the Ediacaran skeletal Cloudina from the Nama Group , Namibia. *Geol. Soc. Am.* 45, 1–4. <https://doi.org/10.1130/G38807.1>
- Wood, R., Ivantsov, A.Y., Zhuravlev, A.Y., 2017b. First macrobiota biomineralization was environmentally triggered. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0059>
- Wood, R., Liu, A.G., Bowyer, F., Wilby, P.R., Dunn, F.S., Kenchington, C.G., Cuthill, J.F.H., Mitchell, E.G., Penny, A., 2019a. Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian Explosion. *Nat. Ecol. Evol.* 3, 528–538. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0821-6>
- Wood, R., Liu, A.G., Bowyer, F., Wilby, P.R., Dunn, F.S., Kenchington, C.G., Cuthill, J.F.H., Mitchell, E.G., Penny, A., 2019b. Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian Explosion. *Nat. Ecol. Evol.* 3, 528–538. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0821-6>
- Wood, R.A., 2011. Paleoecology of the earliest skeletal metazoan communities : Implications for early biomineralization. *Earth Sci. Rev.* 106, 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.011>
- Wood, R.A., Pulton, S.W., Prave, A.R., Hoffmann, K.H., Clarkson, M.O., Guilbaud, R., Lyne, J.W., Tostevin, R., Bowyer, F., Penny, A.M., Curtis, A., Kasemann, S.A., 2015. Dynamic redox conditions control late Ediacaran metazoan ecosystems in the Nama Group, Namibia. *Precambrian Res.* 261, 252–271.
- Xiao, E., Riaz, M., Zafar, T., Latif, K., 2021. Cambrian marine radial cerebroid ooids : Participatory products of microbial processes. *Geol. J.* 1–18. <https://doi.org/10.1002/gj.4203>
- Xiao, S., Chen, Z., Zhou, C., Yuan, X., 2019. Surfing in and on microbial mats: Oxygen-related behavior of a terminal Ediacaran bilaterian animal. *Geology* 47, 1054–1058. <https://doi.org/10.1130/G46474.1>
- Xiao, S., Yuan, X., Steiner, M., Knoll, A.H., 2002. Macroscopic carbonaceous compressions in a Terminal Proterozoic shale: a systematic reassessment of the Miaohu Biota, South China. *J. Palaeogeogr.* 76, 347–376.
- Xing, Y., Q. Ding, H., Luo, T.H., Wang, Y., 1984. The Sinian–Cambrian Boundary of China, 10, in: *Bulletin of the Institute of Geology. Chinese Academy of Geological Sciences (Special Issue)*. p. 260.

- Xunlai, Y., Jun, L.I., Ruiji, C.A.O., 1999. A diverse metaphyte assemblage from the Neoproterozoic black shales of South China. *Lethaia* 32, 143–155.
- Yang, B., Steiner, M., Schiffbauer, J.D., Selly, T., Wu, X., Zhang, C., Liu, P., 2020. Ultrastructure of Ediacaran cloudinids suggests diverse taphonomic histories and affinities with non-biomineralized annelids. *Sci. Rep.* 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56317-x>
- Yang, B., Steiner, M., Zhu, M., Li, G., Liu, J., Liu, P., 2016. Transitional Ediacaran–Cambrian small skeletal fossil assemblages from South China and Kazakhstan: Implications for chronostratigraphy and metazoan evolution. *Precambrian Res.* 285, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.09.016>
- Yang, B., Warren, L. V, Steiner, M., Smith, E.F., 2021. Taxonomic revision of Ediacaran tubular fossils : Cloudina , Sinotubulites and Conotubus. *J. Paleontol.* 1–18. <https://doi.org/10.1017/jpa.2021.95>
- Yose, L.A., Heller, P.L., 1989. Sea-level control of mixed-carbonate-siliciclastic, gravity flow deposition: Lower part of the Keeler Canyon Formation (Pennsylvanian), southeastern California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 101, 427–439.
- Zaine, M.F., Fairchild, T.R., 1985. Comparison of *Aulophycus luciano* Beurlen and Sommer from Ladario (MS) and the genus *Cloudina* Germs, Ediacaran of Namibia. *An. Acad. Bras. Cienc.* 57, 130–130.
- Zbinden, M., Le Bris, N., Compère, P., Martinez, I., Guyot, F., Gaill, F., 2003. Mineralogical gradients associated with alvinellids at deep-sea hydrothermal vents. *Deep. Res. I* 50, 269–280. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00161-9)
- Zeller, M., Verwer, K., Eberli, G.P., 2015. Depositional controls on mixed carbonate – siliciclastic cycles and sequences on gently inclined shelf profiles. *Sedimentology* 1–29. <https://doi.org/10.1111/sed.12215>
- Zhang, G., Parry, L.A., Vinther, J., Ma, X., Parry, L.A., 2022. Exceptional soft tissue preservation reveals a cnidarian affinity for a Cambrian phosphatic tubicolous enigma. *Proc. B* 289, 1–9.
- Zhu, M., Zhuravlev, A.Y., Wood, R.A., Zhao, F., Sukhov, S.S., 2017. A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bioand chemostratigraphy from the Siberian Platform. *Geology* 45, 459–462. <https://doi.org/10.1130/G38865.1>
- Zhuravlev, A.Y., Liñán, E., Vintaned, J.A.G., Debrenne, F., Fedorov, A.B., 2012. New finds of skeletal fossils in the terminal Neoproterozoic of the Siberian Platform and Spain. *Acta Palaeontol. Pol.* 57, 205–224. <https://doi.org/10.4202/app.2010.0074>

Zhuravlev, A.Y., Wood, R.A., 2018. The two phases of the Cambrian Explosion. Sci. Rep. 8, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34962-y>